

doi: 10.7690/bgzd.2014.09.002

# 基于单参数灵敏度方法的轨道炮系统性能影响因素分析

李小将, 杨成伟, 武昊然  
(装备学院研究生院, 北京 101416)

**摘要:** 为确定电磁轨道炮系统性能具体受哪些影响因素的牵制, 提出基于单参数灵敏度方法的轨道炮系统性能影响因素分析方法。对电容驱动型固体电枢轨道炮系统运行不同阶段的能量分布进行说明, 明确评价系统性能采用的指标, 并通过相关数学模型确定系统性能影响因素, 利用 Matlab/Simulink 数学工具箱搭建系统仿真模型, 通过合理地设置参数初值与对设定几种参数的离散取样实现仿真过程。仿真结果表明: 除轨道几何尺寸外, 电枢质量、电容器初始充电电压、电容器电容值等参数对系统性能均存在较大影响, 并且不同参数与系统性能之间不是简单的线性关系, 在实际应用中应根据具体情况对不同参数选用合适取值。

**关键词:** 系统性能; 影响因素; 单参数灵敏度分析  
**中图分类号:** TJ306 **文献标志码:** A

## Analysis of Influencing Factors of Railgun System Performance Based on Single Parameter Sensitivity Method

Li Xiaojiang, Yang Chengwei, Wu Haoran  
(College of Graduate, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

**Abstract:** To determine which factor constrains railgun system performance specifically, putting forward an analysis method for the factors with the single parameter sensitivity analysis method. This paper explained the energy distribution at different operation stages of a capacitor-driven railgun system with a solid armature, and cleared the indicators used in evaluating system performance, and also determined the factors that affected system performance by mathematical model, and then built system simulation model by using Matlab/Simulink math toolbox, and at last realized simulation process by setting initial parameters and discrete sampling of them properly. Simulation results show that: the track geometry addition, the armature mass, the initial capacitor charging voltage, the capacitance value of the capacitor parameters a greater impact on system performance are present, and is not a simple linear relationship between different parameters and system performance, in practice applications should choose the appropriate values for different parameters depending on the circumstances.

**Keywords:** system performance; influencing factors; single parameter sensitivity analysis

### 0 引言

随着现代战争形式的不断发展, 以传统火炮、导弹为主要火力支撑的局面逐渐被打破, 一批新概念武器开始崭露头角。电磁轨道炮作为新概念武器的一种, 凭借自身诸多优点成为当前各国研究的热点。当前电磁轨道炮每次发射都要消耗大量的能量, 如何充分利用有限能量使系统发挥出更大的性能是值得深入研究的课题, 而确定系统性能具体受到哪些影响因素的牵制更是非常关键; 因此, 笔者运用单参数灵敏度方法, 对电容驱动型固体电枢轨道炮系统的几种影响因素进行分析。

### 1 不同阶段系统能量分布

轨道炮系统在运行时工况较为复杂, 涉及到多方面能量转换, 简单从弹丸炮口速度来衡量系统的好坏是很片面的。可以利用能量守恒观点, 综合考虑系统发射前后能量变化, 最终确定系统性能评

价指标。对于笔者考虑的电容驱动型固体电枢轨道炮系统, 初始电容器中储存的能量在系统运行结束后除了部分转化为电枢的动能外, 通常还包括以下几种能量损失<sup>[1]</sup>: 1) 电枢离开炮口时回路中的剩余磁能; 2) 电枢与 2 根轨道的电阻热损失; 3) 电枢与轨道的摩擦损失; 4) 电枢与空气摩擦造成的能量损失; 5) 电容本身的能量损失及可能存在的 2 根轨道克服固定装置的束缚产生的额外功等。图 1 所示为轨道炮系统不同运行阶段能量分布示意图。为简化研究, 假设笔者考虑的轨道炮系统电容器为不存在内阻的理想电容。

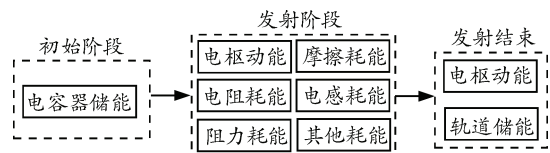


图 1 轨道炮系统运行不同阶段能量分布

由图 1 可知, 轨道炮系统在发射阶段存在的能

收稿日期: 2014-03-20; 修回日期: 2014-04-22

作者简介: 李小将(1973—), 男, 江西人, 博士, 教授, 从事武器系统与运用分析研究。

量损失种类最多，并且在发射结束阶段轨道内仍存在着大量的剩余能量未被有效利用<sup>[2]</sup>。若能最大限度地减小发射阶段能量损失，对轨道炮发射系统的发展将带来巨大的推动作用。根据王莹教授《电炮原理》<sup>[1]</sup>中的理论，固体电枢轨道炮系统中，除电枢轨道造成的摩擦损失及电枢空气间摩擦造成的能量损失计算非常复杂外，其余各项都能通过具体的公式计算得出。

### 2 系统能量转换效率与性能影响因素

常见的系统性能描述均以效率为衡量指标，为了对轨道炮系统的性能有更加合理的描述，通常将效率分为系统效率  $\eta_s$  和发射效率  $\eta_l$ <sup>[3]</sup> 2 种表现形式。前者表示电容作为驱动电流来源时的能量利用率；后者则指实际输入到系统中的能量利用率，可分别表示如下：

$$\eta_s = \frac{E_v}{E_c} \times 100\% \quad \eta_l = \frac{E_v}{E_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $E_c$ 、 $E_v$ 、 $E_i$  分别表示电容器初始储能、电枢离开炮膛时的动能和系统输入能量。其各自表达式为：

$$E_c = \frac{1}{2} C U_{c0}^2 \quad (2)$$

$$m_a = F_E - F_k - F_f = \frac{S \mu_0}{\pi w h} \int_{0.5s}^{0.5s+w} \tan^{-1} \frac{xh}{y\sqrt{4y^2 + 4x^2 + h^2}} dy I^2 - 1.1 \rho_0 h s v^2 - \mu_f \left( F_0 + \frac{l_d}{s} \frac{L I^2}{2} \right) \quad (5)$$

结合文献[7]并分析式 (5) 可以得出电容驱动型固体电枢轨道炮系统影响因素主要包括轨道及电枢几何尺寸 ( $h, s, w, L, l_d$ )、电枢质量  $m$  和电流  $I$ ，而根据轨道炮系统电路方程及电容放电特点可知，系统回路电流的大小与电容器电容值  $C$  及初始充电电压  $U_{c0}$  等有关。由于轨道几何尺寸的影响已经在文献[6]中提及，下面采用单参数灵敏度分析方法对其他几个影响因素进行分析研究。

### 3 影响因素单参数灵敏度分析

根据系统机电模型<sup>[8]</sup>及力学模型<sup>[9]</sup>，考虑系统运行过程中的过阻尼和欠阻尼 2 种情况，搭建系统 Simulink 模型 (见图 2)，并利用其自带 Switch 模块实现模态转换功能，在子系统中定义仿真停止条件：当电枢离开炮口 (轨道长度设定为 1 m) 时停止。

依次选用不同的参数进行灵敏度分析，具体的参数变化情况见表 1 所示。

为节省篇幅，只列出了不同质量电枢的轨道炮系统响应情况。当研究电枢质量的影响时，除电枢质量外，系统中其他各项参数初值的选取见表 2。

$$E_v = \frac{1}{2} m (v^2 - v_0^2) \quad (3)$$

$$E_i = \frac{3}{2} L \int_0^\tau v(t) I^2(t) dt + 2R \int_0^\tau x(t) I^2(t) dt + 2Lx(\tau)I(\tau) - L \int_0^\tau v(t) I(t) dt \quad (4)$$

式中： $C$ 、 $U_{c0}$  分别为电容器电容值和电容器初始充电电压； $m$ 、 $v_0$ 、 $v$  分别为电枢质量、初速度和离开炮膛时速度； $\tau$  为电枢离开炮口时刻。式 (4) 为根据功能理论，将轨道炮系统电路方程等号左右同时乘以回路电流  $I(t)$  并在  $0-\tau$  范围内积分所得。

从系统效率和发射效率的公式描述可以看出：系统效率大小标志着电容驱动型轨道炮发射周期内的能量利用程度，所反映的是整个系统回路参数结构；发射效率主要反映的是轨道炮系统本身的效率情况<sup>[4]</sup>，计算时考虑了能量损失，此部分能量要比电容的初始储能小，从而也有系统效率必将小于发射效率的结论。

综合考虑文献[5]中的空气阻力、电枢摩擦阻力模型及文献[6]中的电感梯度计算公式，利用牛顿定律可列写电容驱动型固体电枢轨道炮系统的电枢整体受力方程如下：

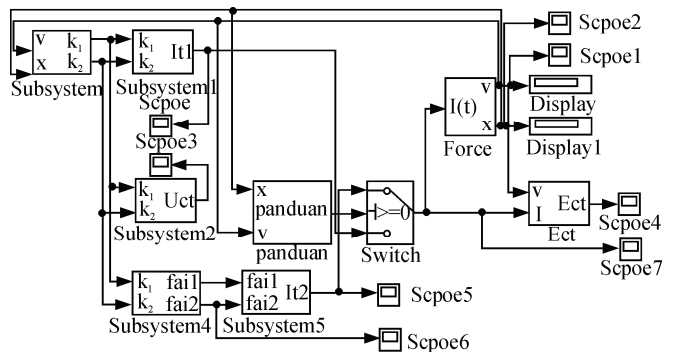


图 2 轨道炮系统 Simulink 仿真模型

表 1 系统参数变化

仿真次数	参数 1 电枢	参数 2 电容器	参数 3 电容器
	质量/g	电压/V	电容/F
1	10	5 000	0.000 5
2	20	8 000	0.000 8
3	30	10 000	0.001 2
4	40	12 000	0.001 5
5	50	15 000	0.002 0

表 2 电枢质量变化时系统初值

参数	数值	参数	数值
轨道间距/m	0.03	电容器电压/V	10 000
轨道高度/m	0.03	电阻梯度/( $\Omega/m$ )	$3 \times 10^{-4}$
轨道宽度/m	0.03	摩擦系数	0.3
电枢长度/m	0.02	真空磁导率/(H/m)	$3\pi \times 10^{-7}$
电容器电容/F	0.001 2	电枢初始位置/m	0.003

在 Matlab/Simulink 中设置系统求解方法为四阶龙格库塔法, 起止时间分别设置为 0 s 和 0.000 3 s, 通过仿真可得 5 种条件下轨道炮系统电枢速度、位移、电流和电压响应情况, 如图 3。

从图 3 可以看出: 随着电枢质量的增加, 炮口速度减小比较明显, 加速时间越来越长, 最大质量和最小质量造成的系统炮口速度和系统运行时间均相差近 2 倍; 最大电流出现的时间接近且峰值均在  $6.5 \times 10^6$  A 附近, 但是质量越大, 电流的第 2 个波峰出现越提前且峰值越大, 这对电枢的加速是有利的, 最终电流均收敛到零附近; 电压方面除质量大的电枢电压峰值出现时间提前外无明显变化, 随着时间的推移上下震荡, 峰值逐渐减小, 但并没收敛到零。

不同参数对系统性能影响不同, 表 3 对几种参数变化时系统性能的变化情况进行了描述。

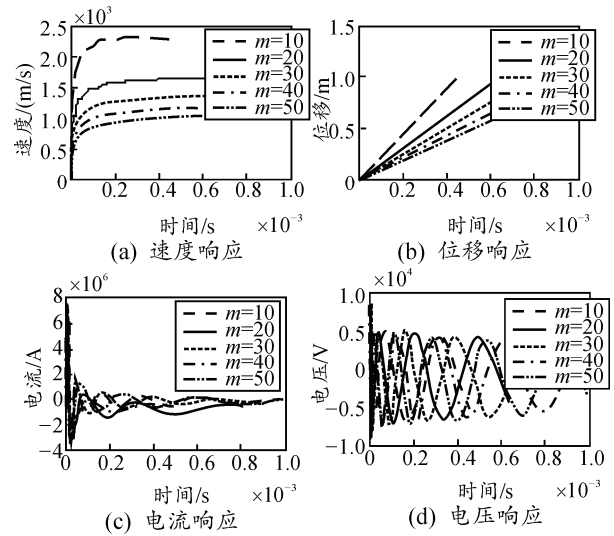


图 3 不同电枢质量系统响应情况

表 3 系统性能变化

仿真次数	炮口速度/(m/s)			炮口动能/J			发射效率/%		
	参数 1	参数 2	参数 3	参数 1	参数 2	参数 3	参数 1	参数 2	参数 3
1	2 295.2	710.7	932.2	26 340	6 313.7	10 862	14.65	17.70	13.09
2	1 662.4	1 174.8	1 196.9	27 636	17 252	17 907	15.09	13.12	13.19
3	1 358.1	1 489.4	1 489.4	27 667	27 729	27 729	15.31	13.12	13.12
4	1 179.9	1 799.7	1 681.4	27 843	40 487	35 339	13.70	16.07	19.24
5	1 053.8	2 303.6	1 977.9	27 762	66 332	48 901	14.46	19.64	14.11

从表 3 可以看出: 在系统性能方面, 对于参数 1, 2 种性能评价指标所反映的结果存在着较大区别: 炮口速度随着电枢质量的增加呈现出单调递减趋势, 但是炮口动能波动却不大, 并没有呈现单调增减的情况, 这一点可以从炮口动能的计算公式中得到解释; 发射效率随电枢质量的增加存在波动较大, 质量为 30 g 时发射效率达到最大随后便减小, 说明发射效率在电枢质量 30 g 附近存在 1 个极值点, 可在该点附近增加取样点以确定最大发射效率时的电枢质量。

对于参数 2 和参数 3, 电枢质量固定的情况下, 炮口速度和炮口动能均随电容器初始充电电压或电容器电容值的增加单调递增; 发射效率随电容器初始充电电压电容器初始充电电压增加波动较大但趋势不明显, 但是发射效率随电容器电容值增加刚开始呈现逐渐增加的趋势, 直到第 4 次仿真发射效率达到最大, 然后出现一个大幅度的下降, 说明并不是电容值越大对发射效率越有利。

#### 4 结论

从分析结果看, 电枢质量、电容器初始充电电压和电容器电容值几种参数对炮口动能及发射效率均存在较大影响, 不同参数与系统性能之间不是简单线性关系, 不能通过单纯的提高或降低某一参数达到系统性能提升的目的。在实际应用中, 电枢的

质量并非一成不变, 应根据任务目的的不同选用不同质量电枢; 而且就当前电源技术发展情况来看, 如果令电容器初始充电电压增大到一定程度势必会对电容造成损伤, 甚至有击穿电极板的可能, 并且大电容的制作向来比较困难, 虽然电容的单位是法拉, 但是常见的电容均在微法甚至皮法之间, 所以不同情况应选用合适的参数取值。

#### 参考文献:

- [1] 王莹, 肖峰. 电炮原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 17-34.
- [2] Marshall R. A., Ying W. Railguns: their science and technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 12-14.
- [3] Tzeng J T, Sun W. Dynamic Response of Cantilevered Rail Guns Attributed to Projectile GunInteraction Theory[J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2007, 43(1): 207-213.
- [4] 陶孟仙, 任兆杏. 503 轨道炮等离子体电枢发射的仿真计算[J]. 火炮发射与控制学报, 1999(4): 61-64.
- [5] 杨玉东, 王建新, 薛文. 轨道炮动态负载特性的分析与仿真[J]. 兵工学报, 2010(8): 1026-1031.
- [6] 杨成伟, 李小将, 武昊然. 矩形截面轨道发射器电感梯度影响因素研究[J]. 兵工自动化, 2013, 32(11): 16-20.
- [7] 王磊磊. 电磁轨道炮电路暂态特性分析及发射组件优化和解析计算[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012: 16-23.
- [8] 胡玉伟. 电磁轨道炮系统的建模与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 15-17.
- [9] 耿彦波. 电磁轨道发射系统动力学研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012: 13-19.